



Astrosismología de estrellas enanas blancas

A.H. Córscico^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata

² Instituto de Astrofísica La Plata (IALP - CONICET)

Contacto/ acorsico@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / La mayoría de las estrellas de masa baja e intermedia que pueblan nuestro Universo finalizarán sus vidas como estrellas enanas blancas. Estos antiguos remanentes estelares guardan en su interior un valioso registro de la historia evolutiva de sus estrellas progenitoras, proveyendo abundante información acerca de la formación y evolución de las estrellas, así como también una estimación de la edad de una variedad de poblaciones estelares, tales como nuestra Galaxia, cúmulos abiertos y globulares. Aunque la composición química, la temperatura y la gravedad superficiales de las enanas blancas pueden ser inferidas a partir de la espectroscopía, la estructura interna de estas estrellas compactas puede ser revelada solo por medio de la astrosismología, una técnica basada en la comparación entre los períodos observados en estrellas variables pulsantes y los períodos teóricos calculados sobre modelos estelares apropiados. En este informe, primero describimos brevemente las propiedades básicas de las estrellas enanas blancas y las distintas familias de enanas blancas pulsantes conocidas, y a continuación presentamos dos de los últimos estudios realizados por el Grupo de Evolución Estelar y Pulsaciones de La Plata en este activo campo de investigación.

Abstract / Most of low- and intermediate-mass stars that populate the Universe will end their lives as white dwarf stars. These ancient stellar remnants have encrypted inside a precious record of the evolutionary history of the progenitor stars, providing a wealth of information about the evolution of stars, star formation, and the age of a variety of stellar populations, such as our Galaxy and open and globular clusters. While some information like surface chemical composition, temperature and gravity of white dwarfs can be inferred from spectroscopy, the internal structure of these compact stars can be unveiled only by means of asteroseismology, an approach based on the comparison between the observed pulsation periods of variable stars and the periods of appropriate theoretical models. In this communication, we first briefly describe the physical properties of white dwarf stars and the various families of pulsating white dwarfs known up to the present day, and then we present two recent analysis carried out by the La Plata Stellar Evolution and Pulsation Group in this active field of research.

Keywords / stars: oscillations — white dwarfs — asteroseismology

1. Introducción

Las estrellas enanas blancas constituyen el destino final de la mayoría ($\sim 97\%$) de todas las estrellas que pueblan el Universo, incluido nuestro Sol. En efecto, todas las estrellas que en la Secuencia Principal (MS) poseen una masa estelar menor a $\sim 8M_{\odot}$, culminarán sus vidas pasivamente como enanas blancas. El lector interesado en detalles acerca de la formación y evolución de enanas blancas puede consultar el artículo de revisión de Althaus et al. (2010). Aquí solo daremos una breve revisión de las principales características de estas estrellas. Las enanas blancas son objetos compactos, caracterizados por densidades medias del orden de $\bar{\rho} \sim 10^6 \text{ gr/cm}^3$ (en comparación, $\bar{\rho}_{\odot} = 1.41 \text{ gr/cm}^3$) y radios de aproximadamente $R_{\star} \sim 0.01R_{\odot}$, y se encuentran cubriendo un amplio rango de temperaturas ($4000 \lesssim T_{\text{eff}} \lesssim 200\,000 \text{ K}$) y por lo tanto un amplio rango de luminosidades ($0.0001 \lesssim L_{\star}/L_{\odot} \lesssim 1000$). La distribución de masas de las enanas blancas alcanza un máximo bien pronunciado en $M_{\star} \sim 0.6M_{\odot}$, aunque el rango de masas es bastante amplio ($0.15 \lesssim M_{\star}/M_{\odot} \lesssim 1.2$). Las enanas blancas con masa promedio probablemente poseen núcleos de ^{12}C y ^{16}O , pero se cree que las menos masivas deberían al-

bergar núcleos compuestos por ^4He , y las mas masivas núcleos hechos de ^{16}O , ^{20}Ne y ^{24}Mg .

Debido a las altas densidades reinantes, la ecuación de estado que gobierna la mayor parte de una enana blanca es la correspondiente a un gas de Fermi de electrones degenerados, los cuales aportan la mayor parte de la presión. A su vez, los iones no degenerados contribuyen a la masa de la estrella y al contenido calórico acumulado durante las etapas evolutivas previas. En términos generales, la evolución de una enana blanca consiste en un gradual enfriamiento, durante el cual las fuentes de energía por reacciones nucleares son irrelevantes. En virtud de las enormes gravedades superficiales ($\log g \sim 8$), las diferentes especies químicas en estas estrellas se encuentran bien separadas debido al efecto de asentamiento gravitacional (*gravitational settling*). Según la especie química dominante en la superficie de las enanas blancas, estas se clasifican en dos grupos principales, las de tipo espectral DA ($\sim 80\%$ del total, atmósferas ricas en H) y las de tipo espectral DB ($\sim 15\%$ del total, atmósferas ricas en He). En la Figura 1 se muestra la estructura química estratificada de un modelo de enana blanca tipo DA. Como

puede apreciarse, el 99% de la masa total de la estrella [$-\log(1-M_r/M_*) \lesssim 2$] está compuesto de C y O, siendo la masa de la capa de He de $\lesssim 0.01M_*$ y la masa de la envoltura de H de $\lesssim 0.0001M_*$.

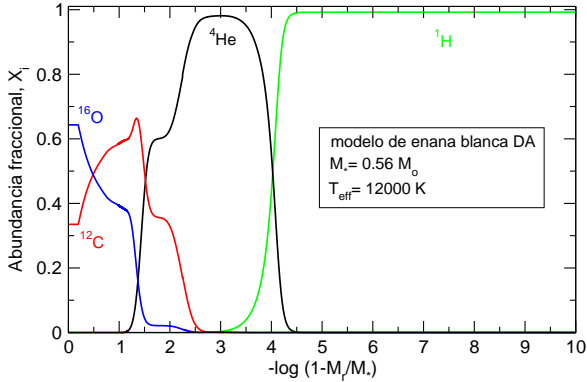


Fig. 1: Estructura química interna (abundancias fraccionales X_i) de un modelo de estrella enana blanca tipo espectral DA. El centro de la estrella se localiza en $-\log(1-M_r/M_*) = 0$.

¿Por qué es importante estudiar las enanas blancas? Una de las principales razones es que son objetos muy antiguos, con edades del orden de $\tau \sim 10^9 - 10^{10}$ años, y por lo tanto contienen valiosa información acerca de la evolución de las estrellas desde el nacimiento hasta su muerte, y acerca de la tasa de formación estelar a lo largo de la historia de nuestra Galaxia. El estudio de las enanas blancas tiene vastas aplicaciones a varios campos de la astrofísica moderna, tales como:

- Estimación de la edad de poblaciones estelares tales como cúmulos abiertos y globulares, el disco y el halo galáctico, a través de la función luminosidad de enanas blancas (“cosmocronología”; ver, por ejemplo, García-Berro et al., 2010);
- Estudios de enanas blancas como progenitoras de SNIa y variables cataclísmicas (novas): eventos energéticos ($E \sim 10^{44} - 10^{51}$ erg) de transferencia de masa sobre una enana blanca desde su compañera;
- Investigación de fenómenos físicos tales como la cristalización, las propiedades de partículas fundamentales (neutrinos, axiones), variación de las constantes fundamentales, etc. Esto es, el uso de las enanas blancas como “laboratorios cósmicos”, en virtud de las densidades y presiones extremadamente altas reinantes en los interiores de estas estrellas, que no pueden replicarse en laboratorios terrestres.

Tradicionalmente, las técnicas empleadas para estudiar estrellas enanas blancas han sido la espectroscopía y fotometría, que permiten inferir la temperatura efectiva, gravedad superficial y composición química, la magnitud de los campos magnéticos (si están presentes), etc. Otra técnica empleada es la astrometría, la cual permite derivar paralajes y distancias, e incluso la gravedad superficial en casos de enanas blancas frías con espectros carentes de líneas. Una técnica más moderna, y en muchos aspectos más potente, es la denominada “astrosismología”, que permite extraer información del *interior*

de las enanas blancas. Los fundamentos de esta técnica son descriptos en la siguiente Sección.

2. Pulsaciones estelares y astrosismología

La astrosismología es una disciplina basada en el siguiente principio: “estudiar como vibra un sistema en sus modos normales para inferir sus propiedades mecánicas”. En el caso de las estrellas, las vibraciones son pulsaciones u oscilaciones globales que permiten “ver” el interior estelar, el cual es inaccesible a través de técnicas tradicionales. El principio básico de la astrosismología es la comparación de los períodos de pulsación de modelos teóricos con los períodos de oscilación medidos en estrellas variables pulsantes. En el caso de las enanas blancas, la astrosismología permite extraer información acerca de la masa estelar, la estratificación química, la composición química del núcleo, la presencia e intensidad de campos magnéticos, las propiedades de la rotación estelar, la física de la convección, etc. Reportes muy detallados de la astrosismología aplicada a estrellas enanas blancas pueden encontrarse en los artículos de revisión de Winget & Kepler (2008) y Althaus et al. (2010).

Las pulsaciones estelares son modos propios de las estrellas. Estos modos pueden pensarse como ondas estacionarias en 3 dimensiones. Cada estrella posee un espectro único de autofrecuencias discretas que está fijado por su estructura interna (“frecuencias naturales”), asociadas con autofunciones que proporcionan las variaciones espaciales de los diferentes parámetros físicos de la estrella al oscilar. En enanas blancas el espectro de frecuencias de pulsación es extremadamente sensible a la estratificación química interna. Las pulsaciones estelares pueden ser radiales, que conservan la forma esférica (Cefeidas, RR Lira, Miras, etc). Estas son un caso particular de una clase muy general de movimientos oscilatorios, denominados pulsaciones no radiales. Estas últimas no mantienen la forma esférica. Pulsaciones no radiales se detectan rutinariamente en el Sol, en estrellas variables tipo-solar, gigantes rojas, δ Scuti, γ Doradus, β Cefeí, SPB, WR, subenanas B, enanas blancas y pre-enanas blancas variables.

En el marco de la teoría lineal (pequeñas amplitudes de pulsación), las deformaciones de una estrella al oscilar en modos esferoidales están especificadas por el vector desplazamiento Lagrangiano (Unno et al., 1989):

$$\vec{\xi}_{n\ell m} = (\vec{\xi}_r, \vec{\xi}_\theta, \vec{\xi}_\phi)_{n\ell m} \quad (1)$$

cuyas componentes en coordenadas esféricas son:

$$\vec{\xi}_r = \xi_r(r) Y_\ell^m(\theta, \phi) e^{i\sigma t} \vec{e}_r \quad (2)$$

$$\vec{\xi}_\theta = \xi_h(r) \frac{\partial Y_\ell^m}{\partial \theta} e^{i\sigma t} \vec{e}_\theta \quad (3)$$

$$\vec{\xi}_\phi = \xi_h(r) \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial Y_\ell^m}{\partial \phi} e^{i\sigma t} \vec{e}_\phi \quad (4)$$

donde $Y_\ell^m(\theta, \phi)$ son los armónicos esféricos, σ es la frecuencia de pulsación, y $\xi_r(r)$ y $\xi_h(r)$ son las autofunciones radial y horizontal, respectivamente. De

esta manera, los modos propios tienen una dependencia temporal sinusoidal, una dependencia angular por medio de los armónicos esféricos, y una dependencia radial dada a través de las autofunciones, las cuales ineludiblemente deben ser obtenidas (para modelos estelares realistas) a través de la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales de pulsación (ver Unno et al., 1989). Los modos de pulsación están caracterizados por tres “números cuánticos”: (1) grado armónico $\ell = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$, que representa $(\ell - m)$ líneas nodales (paralelos) sobre la superficie estelar; (2) orden acimutal $m = -\ell, \dots, -2, -1, 0, +1, +2, \dots, +\ell$, que representa líneas nodales (meridianos) sobre la superficie estelar; y (3) orden radial $k = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$, que representa superficies esféricas nodales sobre las cuales hay desplazamiento nulo. En Figura 2 se muestran en forma ilustrativa las diferentes líneas y superficies nodales para un dado modo de pulsación caracterizado por un set de números cuánticos (ℓ, m, k) .

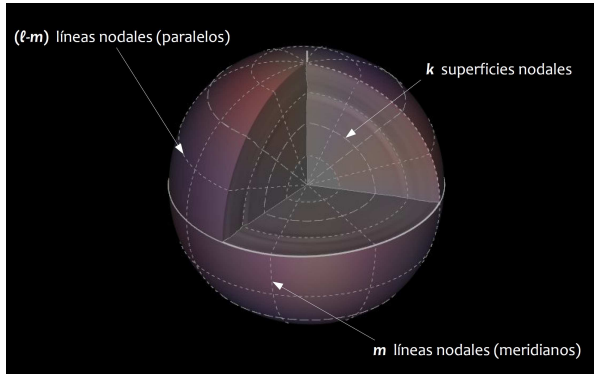


Fig. 2: Esquema ilustrativo indicando el significado de los números cuánticos (ℓ, m, k) que caracterizan a un modo de pulsación no radial (adaptado de <http://userpages.irap.omp.eu/~scharpinet/glpulse3d>).

Finalizamos nuestra descripción de los modos no radiales esferoidales mencionando que existen dos familias de modos que se distinguen de acuerdo a las fuerzas de restitución dominantes. Los modos p , por un lado, involucran grandes variaciones de presión y movimientos mayormente verticales, siendo la fuerza de restitución dominante la compresibilidad. Poseen altas frecuencias (períodos cortos). Los modos g , por otra parte, involucran pequeñas variaciones de presión y desplazamientos mayormente tangenciales. En este caso la fuerza de restitución dominante es la flotación (buoyancy). Los modos están caracterizados por bajas frecuencias (períodos largos). En los casos en que $\ell > 1$, existe una tercer clase de modos, los modos f , con características intermedias entre modos p y g . En general no poseen nodos en la dirección radial ($k = 0$).

3. Clases de enanas blancas pulsantes

A lo largo de su evolución, las enanas blancas atraviesan distintas etapas de inestabilidad en las cuales se tornan estrellas variables pulsantes, exhibiendo curvas de luz

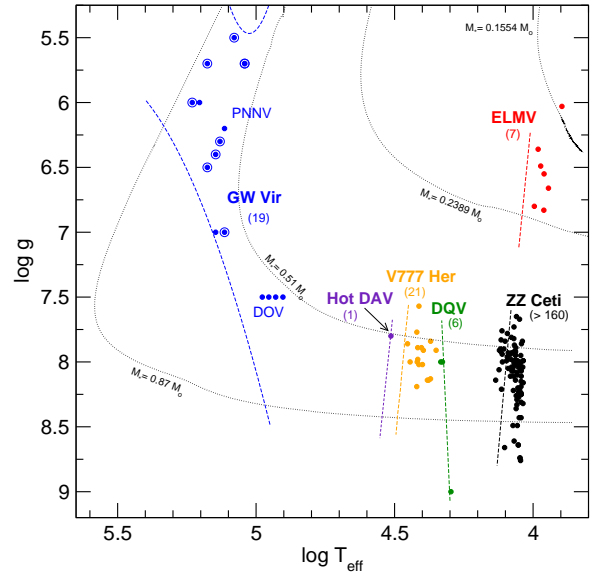


Fig. 3: Localización de las distintas clases de estrellas enanas blancas pulsantes en el plano $\log T_{\text{eff}} - \log g$, indicadas con puntos de diferentes colores. Entre paréntesis incluimos el número de miembros conocidos hasta el momento de cada clase. Cuatro caminos evolutivos de modelos de enanas blancas son incluidos como referencia con líneas de puntos. También se muestran los borde azules teóricos de las diferentes bandas de inestabilidad con líneas de trazos. Círculos rodeando los puntos azules indican la presencia de una nebulosa planetaria (variables GW Vir PNNV).

con variaciones en el óptico y en el UV lejano. Los cambios de brillo son debidos a modos g con grado armónico $\ell = 1, 2$ que producen variaciones en la temperatura superficial*. La primera enana blanca variable fue descubierta por Landolt (1968). Desde entonces se han descubierto más de 200 objetos pulsantes a través de observaciones desde Tierra, en su gran mayoría extraídas del SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*), y en los últimos años también por medio de misiones espaciales como la *Kepler Mission***.

Las variaciones de brillo de estas estrellas tienen amplitudes entre 0.001 y 0.3 magnitudes. Exhiben una gran variedad de curvas de luz, algunas sinusoidales y de pequeña amplitud, otras no lineales y de gran amplitud. Son estrellas pulsantes multimodales (pulsan en más de un período), y frecuentemente exhiben armónicos y combinaciones lineales de frecuencias que no están relacionadas con modos genuinos de pulsación.

Se conocen actualmente 6 clases o familias de enanas blancas pulsantes (incluyendo las pre-enanas blancas pulsantes). En la Figura 3 se muestra la localización de las diferentes familias en un diagrama $\log T_{\text{eff}} - \log g$.

* Las variaciones en el radio estelar son muy pequeñas, del orden de $\sim 10^{-5} R_*$, y probablemente no contribuyen a las variaciones en el brillo.

** Actualmente se está desarrollando la primera campaña observacional conjunta de enanas blancas pulsantes entre el Grupo de Evolución Estelar y Pulsaciones de La Plata en Argentina y el grupo liderado por el Prof. S. O. Kepler de Brasil, utilizando el Telescopio de 2.15 m “Jorge Sahade” de CASLEO; ver Corti et al. (2015) en este Boletín.

Tabla 1: Parámetros estelares y propiedades pulsacionales de las distintas familias de enanas blancas pulsantes.

Clase (año de descubrimiento)	#	m_v (mag)	T_{eff} ($\times 1000$ K)	$\log g$ (cgs)	Comp. química superficial	Amplitudes (mag)	Períodos (s)
GW Vir (PNNV) (1984)	10	11.8 – 16.6	110 – 170	5.5 – 7.0	He, C, O	0.01 – 0.15	420 – 6000
GW Vir (DOV) (1979)	9	14.8 – 16.7	70 – 160	6.0 – 7.5	He, C, O	0.02 – 0.1	300 – 2580
Hot DAV (2013)	1	14.4	32	7.5	H	0.001	624
V777 Her (DBV) (1982)	21	13.6 – 16.7	22.4 – 29	7.5 – 8.3	He (H)	0.05 – 0.3	120 – 1080
DQV (2008)	6	17.7 – 19.6 ⁽¹⁾	19 – 22	8 – 9	He, C	0.005 – 0.015	240 – 1100
ZZ Ceti (DAV)	160	12.2 – 16.6	10.4 – 12.4	7.5 – 8.75	H	0.01 – 0.3	100 – 1400
ELMV (2012)	7	16.2 – 18.8 ⁽¹⁾	7.8 – 10	6 – 6.8	H	0.002 – 0.044	1200 – 6200

⁽¹⁾ magnitud g del sistema *ugryz* del relevamiento SDSS.

$\log g$. Como referencia, hemos incluido cuatro caminos evolutivos de modelos de enanas blancas con masas $M_*/M_\odot = 0.16, 0.24, 0.51, 0.87$. Las líneas de trazos indican los bordes calientes o “azules” de las bandas de inestabilidad, derivados teóricamente a través de análisis de estabilidad pulsacional: estrellas GW Vir stars (Córscico et al., 2006), estrellas hot DAV (Shibahashi, 2013), estrellas V777 Her (Córscico et al., 2009), estrellas DQV (Córscico et al., 2009), estrellas ZZ Ceti (Gianninas et al., 2011), y estrellas ELMVs (Hermes et al., 2013). La única diferencia entre las PNNVs y las DOVs es que las primeras poseen una nebulosa planetaria, mientras que las últimas carecen de la misma.

En la Tabla 1 se muestran en forma compacta las principales características de estas familias de enanas blancas pulsantes. La segunda columna indica el número de objetos conocidos a la fecha de escribir este reporte (noviembre de 2014), la tercer columna muestra el rango de magnitudes visuales aparentes, la cuarta columna incluye el rango de temperaturas efectivas en las cuales se las detecta (banda de inestabilidad), la quinta columna proporciona el rango de gravedad superficial, la sexta columna indica la composición química superficial, la séptima columna muestra las amplitudes de las variaciones en las curvas de luz, y finalmente la octava columna proporciona el rango de períodos detectados. Los períodos de pulsación están comprendidos entre ~ 100 s y ~ 1400 s, aunque las PNNVs y las ELMVs exhiben períodos mucho mas largos, hasta ~ 6200 s. Curiosamente, los períodos de los modos g de las enanas blancas son del mismo orden de magnitud que los períodos de los modos p en estrellas pulsantes no degeneradas.

¿Cuál es el origen de las pulsaciones en enanas blancas? De acuerdo a los estudios teóricos corrientes, los modos g observados son *autoexcitados* a través de pro-

cesos térmicos^{***}. En particular, el mecanismo $\kappa - \gamma$ involucra el aumento de la opacidad debido a la ionización parcial de la especie química dominante en la superficie de la estrella, que en el caso de las GW Vir son el C y el O, en las V777 Her es el He, en las DQV es el C, y en las ZZ Ceti y ELMVs es el H. Excepto en el caso de las GW Vir, las cuales carecen de convección superficial debido a sus altas temperaturas efectivas, en las otras categorías un mecanismo de excitación relacionado con la convección (“*convective driving*”) juega un rol crucial una vez que la zona convectiva externa de la estrella se ha profundizado lo suficiente. Finalmente, cabe mencionar el mecanismo ε , el cual es debido al efecto desestabilizante de la combustión nuclear, y que podría ser responsable de la excitación de algunos períodos cortos detectados en una estrella de la familia de las ELMVs (ver Sección 5.).

A pesar de que se conoce con alguna certeza el origen de las pulsaciones en las enanas blancas, poco o nada se sabe acerca del agente que dá lugar al cese de las mismas (borde rojo de la banda de inestabilidad). Tampoco se sabe por qué este tipo de estrellas pulsantes (y en particular las ZZ Ceti) exhiben tan pocos períodos. Afortunadamente, este conocimiento incompleto de la física de las pulsaciones en enanas blancas no nos impide avanzar en estudios astrosismológicos basados en cálculos adiabáticos, en los cuales no importa el agente físico que da origen a las pulsaciones, sino el valor de los períodos en sí mismos, lo cuales dependen sensi-

^{***} Esto, a diferencia de las pulsaciones *forzadas* tales como la excitación estocástica por convección turbulenta, en la que modos que son intrínsecamente estables, son excitados por movimientos convectivos. Este es el caso del Sol, las variables tipo solar y las gigantes rojas variables. Otro ejemplo de pulsaciones forzadas es la excitación por fuerzas de marea en sistemas binarios.

blemente de la estructura interna****. A continuación, nos enfocaremos en dos estudios teóricos recientes en los que ha estado involucrado el Grupo de Evolución Estelar y Pulsaciones de La Plata† en el área de las estrellas enanas blancas pulsantes y astrosismología.

4. Astrosismología de estrellas ZZ Ceti

Las estrellas ZZ Ceti constituyen la clase mas numerosa de enanas blancas pulsantes conocida, con mas de 160 miembros detectados hasta el momento. El gran número de objetos conocidos y estudiados de esta clase de estrellas variables ha permitido estudiar la banda de inestabilidad en forma global (Mukadam et al., 2006), y se ha encontrado que *todas* las enanas blancas tipo espectral DA se tornan pulsantes ZZ Ceti al atravesar dicha banda de inestabilidad ($10\,400 \lesssim T_{\text{eff}} \lesssim 12\,400$ K), es decir, es una banda de inestabilidad “pura”. Lo que implica este resultado es extremadamente importante: cualquier información que pueda inferirse a través de análisis astrosismológicos acerca de la estructura interna de las ZZ Ceti es aplicable también a las enanas blancas DA no variables en general.

Con respecto a los análisis astrosismológicos de estrellas ZZ Ceti, hasta el momento se han aplicado dos metodologías. Una de ellas consiste en el empleo de modelos estelares simples y estáticos (es decir, que no provienen de cálculos evolutivos), caracterizados por perfiles químicos parametrizados *ad hoc*. El otro enfoque, el cual es el adoptado por el Grupo de Evolución Estelar y Pulsaciones de La Plata, emplea modelos resultantes de la evolución completa de las estrellas progenitoras, desde la ZAMS (*Zero Age Main Sequence*) hasta la etapa de enana blanca. Estos modelos son obtenidos con el código evolutivo LPCODE. Nuestro enfoque involucra el uso de ingredientes físicos (ecuación de estado, opacidades, eventos de mezcla, difusión de elementos, etc; ver Althaus et al., 2005) lo mas detallados y actualizados posibles. Esto es particularmente relevante con respecto a la estructura química resultante, que constituye un aspecto crucial para interpretar correctamente los patrones de períodos observados en las estrellas ZZ Ceti. Empleando esta metodología, nuestro grupo ha llevado a cabo el primer estudio astrosismológico detallado sobre un ensamble de 44 estrellas ZZ Ceti mediante el uso de modelos completamente evolutivos de enanas blancas DA (Romero et al., 2012). Los espectros de períodos han sido calculados empleando la versión adiabática del código de pulsaciones LP-PUL (Córscico & Althaus, 2006). Con el fin de ampliar el espacio de parámetros, en dicho estudio se consideraron adicionalmente envolturas de H (M_{H}) mas delgadas (generadas artificialmente) que las que predice la teoría estándar de evolución de enanas blancas (envolturas “canónicas”). Con el fin de encontrar un modelo o solución astrosismológica‡ para cada es-

trella de la muestra, hemos buscado los mínimos de una función de calidad $\chi^2(M_{\star}, M_{\text{H}}, T_{\text{eff}})$ de la forma $\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\Pi_k^{\text{th}} - \Pi_i^{\text{obs}}]^2$, donde Π_k^{th} y Π_i^{obs} son los períodos teóricos y los períodos observados, respectivamente, y N es el número de períodos observados. Uno de nuestros objetos de estudio fue la estrella ZZ Ceti arquetípica, G117–B15A, para la cual obtuvimos una única solución astrosismológica, de esta forma eliminando la ambigüedad de larga data reportada en trabajos previos. Uno de los resultados mas importantes de este estudio sobre el ensamble de 44 estrellas es que existe un amplio rango de espesores de la envoltura de H (ver Figura 4) para las estrellas ZZ Ceti analizadas. La distribución de espesores exhibe una acumulación muy marcada para envolturas gruesas [$\log(M_{\text{H}}/M_{\star}) \sim -4.5$]. Si bien estas envolturas son gruesas, ellas son todavía mas delgadas que las envolturas “canónicas”. También es visible otro pico, mucho menos pronunciado, correspondiente a envolturas muy delgadas [$\log(M_{\text{H}}/M_{\star}) \sim -9.5$]. Similares resultados han sido obtenidos posteriormente sobre una muestra de ZZ Ceti masivas (Romero et al., 2013). En resumen, estos resultados presentan un verdadero desafío para los escenarios evolutivos estándar de formación de enanas blancas DA, los cuales predicen que estos objetos se forman únicamente con envolturas gruesas de H.

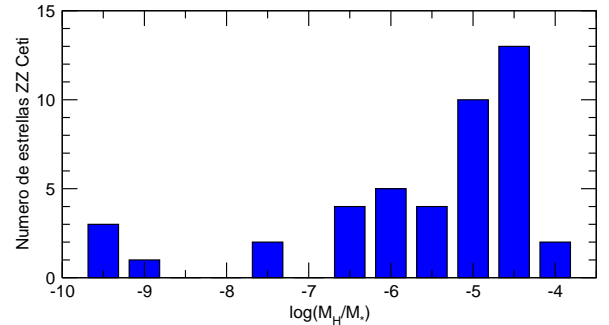


Fig. 4: Histograma mostrando la distribución de espesores de la envoltura de H para un ensamble de 44 estrellas ZZ Ceti brillantes (ver Romero et al., 2012, para mas detalles). Este resultado podría tener validez para todas las estrellas enanas blancas DA en general.

A pesar de los importantes resultados alcanzados usando esta metodología, existen aún incertezas importantes conectadas con la evolución previa de los progenitores de las enanas blancas, tales como la cantidad precisa de mezcla extra (*overshooting*) durante la etapa de combustión central de He, el valor exacto de la tasa de reacciones nucleares $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$, la eficiencia de la difusión de elementos durante el enfriamiento de la enana blanca, etc. En este sentido, en nuestro grupo estamos dando los primeros pasos para evaluar el impacto de dichas incertezas sobre las propiedades de los modelos astrosismológicos de las estrellas ZZ Ceti (De Gerónimo et al. 2015, en preparación).

**** El sonido de las campanas no depende de *cómo* ellas son tocadas (Baade, 1992).

† <http://fcaglp.fcaglp.unlp.edu.ar/evolgroup/>

‡ Un modelo de enana blanca que reproduce con alto grado de precisión los períodos observados de la estrella en estudio.

5. Pulsaciones en estrellas ELMV

La distribución de masas de las enanas blancas exhibe una acumulación para valores $M_\star \lesssim 0.45 M_\odot$. El origen de estas enanas blancas de baja masa, las cuales son del tipo espectral DA (es decir, poseen atmósferas ricas en H), estaría ligado a la evolución binaria, en la cual una estrella de $\sim 1 M_\odot$ con fuertes pérdidas de masa en la fase de RGB (*Red Giant Branch*) evitaría el flash de He (Althaus et al., 2013). Como resultado, estos objetos deberían tener núcleos de He, a diferencia de las enanas blancas de masa promedio, las cuales poseen probablemente núcleos hechos de C y O.

En general, los progenitores de las enanas blancas de baja masa experimentan múltiples flashes de H, lo cual conduce a una reducción importante en el espesor de la envoltura de H. Sin embargo, en el caso de las llamadas enanas blancas ELM (*Extremely Low Mass*), caracterizadas por masas $M_\star \lesssim 0.18 - 0.20 M_\odot$, los progenitores no experimentan flashes, lo cual resulta en envolturas muy gruesas. La presencia de envolturas muy gruesas en las ELMs es la razón por la cual, a diferencia de lo que sucede en las enanas blancas en general, la combustión nuclear estable del H a través de la cadena *pp* es muy importante y controla su evolución[§]. Esto conduce a edades de enfriamiento enormes en este tipo de estrellas ($\tau \sim 10^9$ años) en comparación con aquellas con masas $M_\star \gtrsim 0.18 - 0.20 M_\star$ ($\tau \sim 10^7$ años). Este resultado se conoce como “dicotomía de edades” (Althaus et al., 2001, 2013).

Steinfadt et al. (2010) fueron los primeros en sugerir que las enanas blancas ELM deberían pulsar en modos *g* de la misma naturaleza que las ZZ Ceti. Dicha predicción fue confirmada por Hermes et al. (2012), quienes descubrieron la primera enana blanca ELM variable (ELMV). El origen de las pulsaciones fue explicado en detalle por Córscico et al. (2012), quienes llevaron a cabo detallados cálculos de estabilidad pulsacional. Estos autores encontraron que una gran cantidad de modos *g*, con períodos similares a los observados, son excitados a través del mecanismo $\kappa - \gamma$ actuando en la zona de ionización parcial del H en modelos de enanas blancas ELM. Estos resultados fueron más tarde confirmados por los cálculos independientes de Van Grootel et al. (2013).

Nuevas observaciones fotométricas han llevado a la detección de otras estrellas ELMVs (Hermes et al., 2013,?; Kilic et al., 2015, Bell et al., 2014[¶], 2015, en preparación), con lo cual actualmente se conocen 7 objetos de este pequeño grupo de enanas blancas pulsantes. Las estrellas ELMVs exhiben en general períodos muy largos. En la Figura 5 se muestran los períodos detectados en las 7 estrellas conocidas. Los períodos largos pueden explicarse con comodidad como debidos a modos *g* con grado armónico $\ell = 1$ o $\ell = 2$.

Es interesante notar que la estrella SDSS J1112 ex-

[§] Un fenómeno similar se verifica en enanas blancas de masa promedio provenientes de progenitores de muy baja metalicidad, $Z \lesssim 0.001$; ver Miller Bertolami et al. (2013) y Camisassa et al. (2015) en este Boletín.

[¶] 19th European Workshop on White Dwarfs, Montréal, Canada.

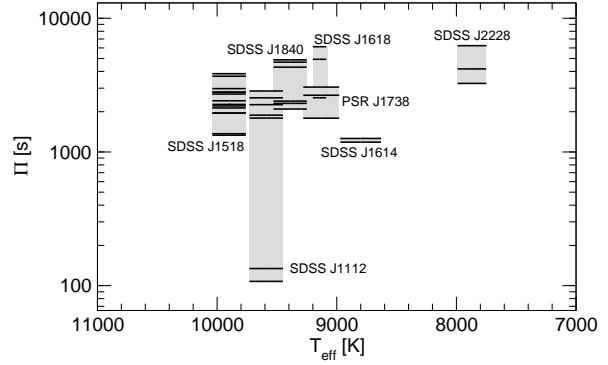


Fig. 5: Períodos de pulsación de las 7 estrellas ELMVs conocidas en términos de la temperatura efectiva.

hibe dos períodos muy cortos, de ~ 108 s y ~ 134 s, además de períodos largos. Estos períodos anómalos podrían estar asociados a modos *p* de bajo orden radial *k*, o inclusive a modos radiales. Sin embargo, si la temperatura efectiva y la gravedad de SDSS J1112 son correctas, los modelos de enanas blancas ELM no son capaces de reproducir esos períodos con modos *p* y/o modos radiales (Córscico & Althaus, 2014a). Otra posibilidad es que se trate de modos *g* de bajo orden radial. Esta última opción, sin embargo, es difícil de concebir por el hecho de que los resultados teóricos predicen inestabilidad para períodos más largos, $\Pi \gtrsim 1100$ s (Córscico et al., 2012; Van Grootel et al., 2013).

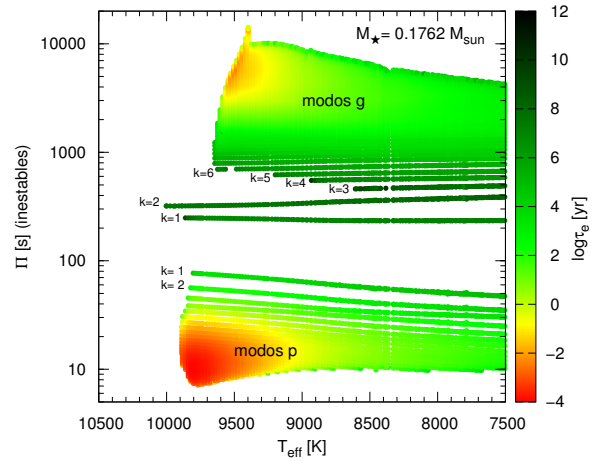


Fig. 6: Períodos de modos dipolares ($\ell = 1$) inestables en función de la temperatura efectiva, correspondientes a un modelo de enana blanca ELM con masa $M_\star = 0.1762 M_\odot$. La escala de la izquierda con el código de colores corresponde al *e-folding time* (la escala de tiempo de crecimiento de las amplitudes).

Dado que, como mencionamos, estas estrellas poseen envolturas muy gruesas de H, ellas son capaces de sostener combustión de H en forma estable, lo que provoca un retardo importante en su enfriamiento. En el Grupo de Evolución Estelar y Pulsaciones de La Plata decidimos considerar la posibilidad de que esos modos de corto período sean modos *g* de bajo orden *k* excita-

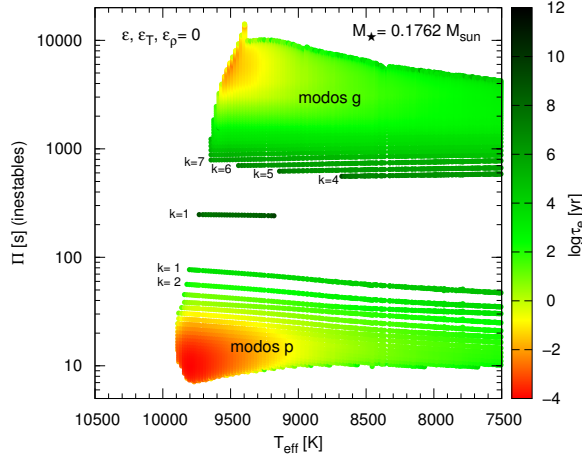


Fig. 7: Igual que la Figura 6, pero para el caso en que el mecanismo ε es suprimido ($\varepsilon = \varepsilon_T = \varepsilon_\rho = 0$).

dos por el mecanismo ε actuando en la capa de H en combustión. Para tal fin, hemos llevado a cabo cálculos de estabilidad pulsacional sobre una grilla de secuencias evolutivas de enanas blancas ELM provenientes de la evolución binaria y publicadas en Althaus et al. (2013). Los cálculos de estabilidad han sido realizados empleando la versión no adiabática del código de pulsaciones LP-PUL (Córscico et al., 2006). En la Figura 6 graficamos los períodos de modos inestables con grado armónico $\ell = 1$ en términos de la temperatura efectiva, correspondientes a un modelo de enana blanca ELM con masa $M_* = 0.1762 M_\odot$. El código de colores (escala de la izquierda) indica el valor del logaritmo de la escala de tiempo de crecimiento de las amplitudes (*e-folding times*, τ_e) de cada modo inestable. La figura muestra un espectro de modos g y p excitados por el mecanismo $\kappa - \gamma$ actuando en la región de ionización parcial del H. En todos los casos, la escala de tiempo de crecimiento de la amplitud de los modos es entre 10 y 100 veces mas corta que la evolutiva, con lo cual los modos excitados tienen tiempo suficiente para alcanzar amplitudes observables. Si se suprime el mecanismo ε en los cálculos de estabilidad pulsacional, los modos g con $k = 1, 2, 3$ y 4 ya no son inestables (en ciertos rangos de T_{eff}), como queda claramente evidenciado en la Figura 7. Esto implica que, en efecto, el mecanismo ε es capaz de desestabilizar modos g de bajo orden radial con períodos cortos similares a los exhibidos por SDSS J1112. Un acuerdo mas cercano con los períodos observados puede lograrse considerando modos cuadrupolares ($\ell = 2$), como se detalla en el artículo de Córscico & Althaus (2014b). Si la realidad de los modos de corto período observados en esta estrella es confirmada, esta podría ser la primera demostración de la existencia de combustión nuclear en enanas blancas frías.

Agradecimientos: Quisiera agradecer a los miembros del Comité Científico de la 57° Reunión de la Asociación Argentina de Astronomía por la amable invitación para presentar este informe.

Referencias

- Althaus L. G., et al., 2010, *A&A Rev.*, 18, 471
Althaus L. G., Miller Bertolami M. M., Córscico A. H., 2013, *A&A*, 557, A19
Althaus L. G., Serenelli A. M., Benvenuto O. G., 2001, *MNRAS*, 323, 471
Althaus L. G., et al., 2005, *A&A*, 435, 631
Baade D., 1992, in Klare G., ed., *Reviews in Modern Astronomy Vol. 5 of Reviews in Modern Astronomy, Observational Aspects of Stellar Seismology.* pp 125–142
Córscico A. H., Althaus L. G., 2006, *A&A*, 454, 863
Córscico A. H., Althaus L. G., 2014a, *A&A*, 569, A106
Córscico A. H., Althaus L. G., 2014b, *ApJL*, 793, L17
Córscico A. H., Althaus L. G., Miller Bertolami M. M., 2006, *A&A*, 458, 259
Córscico A. H., et al., 2009, *Journal of Physics Conference Series*, 172, 012075
Córscico A. H., et al., 2009, *A&A*, 506, 835
Córscico A. H., et al., 2012, *A&A*, 547, A96
García-Berro E., et al., 2010, *Nature*, 465, 194
Gianninas A., Bergeron P., Ruiz M. T., 2011, *ApJ*, 743, 138
Hermes J. J., et al., 2013, *MNRAS*, 436, 3573
Hermes J. J., et al., 2013, *ApJ*, 765, 102
Hermes J. J., et al., 2012, *ApJL*, 750, L28
Kilic M., et al., 2015, *MNRAS*, 446, L26
Landolt A. U., 1968, *ApJ*, 153, 151
Miller Bertolami M. M., Althaus L. G., García-Berro E., 2013, *ApJL*, 775, L22
Mukadam A. S., et al., 2006, *ApJ*, 640, 956
Romero A. D., et al., 2012, *MNRAS*, 420, 1462
Romero A. D., et al., 2013, *ApJ*, 779, 58
Shibahashi H., 2013, in Alecian G., Lebreton Y., Richard O., Vauclair G., eds, *EAS Publications Series Vol. 63 of EAS Publications Series, A new kind of pulsator in the DB valley of white dwarf stars.* pp 185–190
Steinfadt J. D. R., Bildsten L., Arras P., 2010, *ApJ*, 718, 441
Unno W., et al., 1989, *Nonradial oscillations of stars*
Van Grootel V., et al., 2013, *ApJ*, 762, 57
Winget D. E., Kepler S. O., 2008, *ARA&A*, 46, 157